

## Badania pojazdów szynowych w tunelach aerodynamicznych

*W pracy przedstawiono badania doświadczalne w tunelach aerodynamicznych. Opisano typy tuneli oraz metody badań i zjawiska fizyczne występujące podczas badań. Artykuł powstał w wyniku realizacji projektu badawczego KBN Nr 5T12C03025.*

### 1. WSTĘP

Koniec ubiegłego wieku i początek obecnego charakteryzuje się intensywną rozbudową linii kolejowych przeznaczonych do jazdy pociągów z dużą prędkością. Tego rodzaju pociągi są obiektami bardzo złożonymi, powstałymi w wyniku wykorzystania najnowszych osiągnięć nauki, techniki i metod wytwarzania. Nad pociągami TGV nowej generacji do jazdy z prędkością 360 km/h prowadziło intensywne badania około 50 laboratoriów i innych placówek naukowych francuskich, amerykańskich, belgijskich i szwedzkich. Ważną część tych badań stanowiły badania aerodynamiczne [1].

Właściwe zaprojektowanie pociągu o dużej prędkości wymaga dokładnego poznania i uwzględnienia zjawisk siłowego oddziaływania pomiędzy pojazdami i opływającym je powietrzem. Osiągnięcie jak największej prędkości pociągów za jak najmniejszą cenę sprowadza się głównie do tego, że muszą one być przede wszystkim aerodynamiczne, aby opór powietrza powstający podczas ich ruchu, a także hałas towarzyszący temu ruchowi były możliwie jak najmniejsze. Z tej przyczyny wszystkie pociągi o dużej prędkości mają gładze powierzchnie i znacznie mniej załamań konstrukcyjnych niż lokomotywy i wagony tworzące pociągi do jazdy z mniejszą prędkością.

Istnieje dość powszechne przekonanie, że aerodynamika służy wyłącznie do zmniejszania oporów ruchu poprzez racjonalny wybór kształtów zewnętrznych pojazdów i pociągów. Stanowi to duże zawężenie problemu [2].

Badania aerodynamiczne umożliwiają rozwiązywanie następujących zagadnień:

- zmniejszenie oporów powietrza,
- ograniczenie hałasu,
- zwiększenie bezpieczeństwa ruchu pociągu,
- polepszenie odbioru prądu,
- zwiększenie efektywności chłodzenia silników trakcyjnych oraz wentylacji hamulców,
- zwiększenie stateczności jazdy i inne.

Badania aerodynamiczne obejmują dwie zasadnicze części: badania teoretyczne oraz badania eksperymentalne.

Najnowsze teoretyczne badania aerodynamiczne oparte są o metody numerycznej mechaniki płynów. Stosuje się je w początkowej fazie projektowania pojazdów, kiedy ustala się ich zewnętrzne kształty oraz wybiera i optymalizuje rozwiązania konstrukcyjne. Badania teoretyczne mogą być z powodzeniem stosowane do:

- optymalizacji kształtów przedniej i tylnej części pojazdu czołowego i końcowego zespołu trakcyjnego,
- obliczania rozkładu ciśnienia na przednich i tylnych częściach pojazdów trakcyjnych w celu optymalizacji ich kształtów i racjonalnego usytuowania wlotów i wylotów powietrza na pudle,

- ustalenia wpływu kształtu przedniej części pojazdu na działanie pantografu i właściwego jego rozmieszczenia na dachu,
- badania zjawisk zachodzących podczas mijania się pociągów oraz wjeździe pociągu do tunelu.

Jednak przy obecnym stanie nauki i techniki, za pomocą badań teoretycznych, nie można na razie dokładnie opisać wszystkich zjawisk zachodzących podczas jazdy pociągu, wywołującego silne zaburzenia przepływu powietrza. Ograniczenie stosowania teoretycznych metod badań wynika z następujących przyczyn:

1. Pojazd szynowy, który oprócz pudła posiada wózki, wyposażenie podwagony i inne wystające z obrysu części, nie jest bryłą jednorodną. Przepływ powietrza wokół niego nie jest potencjalny. Odbywa się on z oderwaniem strug i występowaniem obszarów o dużym zawirowaniu.
2. Obliczenie oporów spowodowanych nieuporządkowanym przepływem powietrza pomiędzy pojazdem a torem za pomocą równań ruchu i zasady ciągłości przepływu jest trudne do wykonania.
3. Opory ciśnienia pudła (bryły jednorodnej) pojazdu czołowego i końcowego są stosunkowo małe w porównaniu z oporami tarcia pociągu oraz z oporami pozostałych, wystających poza pudła, części pojazdu [3].
4. Zmiany przepływu powietrza i oporów przy oblodzeniu fragmentów pojazdów, jakie występują w rzeczywistych warunkach eksploatacji, są trudne do odwzorowania.

Oprócz tego, jak słusznie zauważa autor pracy [4], rozwiązania numeryczne nie są tanie. Tworzenie skomplikowanej geometrii i podział bryły na elementy tworzące siatkę wymaga czasu i wykwalifikowanego, sprawnego użytkownika. Każdą drobną zmianą geometrii wymaga nowego obliczenia, trwającego kilka do kilkunastu dni, a niekiedy generacji nowej siatki.

Metody komputerowej symulacji przepływu mogą dostarczać niezbyt dokładnych danych. Badania tunelowe dają bardziej dokładne wyniki. Różnice pomiędzy wynikami z różnych tuneli są mniejsze niż różnice wyników obliczeń za pomocą różnych programów.

Od końca lat osiemdziesiątych XX wieku, kiedy coraz częściej zaczęto sięgać do symulacji numerycznych rozwiązywania problemów aerodynamiki pojazdów obie metody, teoretyczna i eksperymentalna, wykorzystująca tunele aerodynamiczne, stały się komplementarne.

## 2. TUNELE AERODYNAMICZNE

### 2.1. Ogólne wiadomości

Tunele aerodynamiczne przeznaczone są do badania różnych obiektów, takich jak samolot, pociąg, samochód, skoczek narciarski itd., poruszających się względem powietrza.

Ich konstrukcja umożliwia uzyskanie równomiernego, ustalonego przepływu powietrza o określonej prędkości. Teoretyczną podstawę obliczenia tunelu aerodynamicznego stanowi równanie energii powietrza przepływającego przez tunel. W szczególności dla przepływu powietrza z prędkością poddźwiękową, przy liczbie Macha  $M < 0,3$ , z jaką mamy do czynienia w przypadku pociągów kolejowych, wykorzystuje się równanie Bernoulli'ego. Podaje ono zależność pomiędzy prędkością powietrza a ciśnieniem wzdłuż linii prądu powietrza:

$$p + \frac{1}{2} \rho V^2 = const \quad (1)$$

gdzie:

- $p$  – ciśnienie [Pa],
- $\rho$  – gęstość [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ], (na poziomie morza  $\rho = 1,226 \text{ kg}/\text{m}^3$ ),
- $V$  – prędkość napływu powietrza [m/s].

Z powyższej zależności wynika, że wzrostowi ciśnienia towarzyszy zmniejszenie prędkości i odwrotnie – wzrost prędkości powoduje spadek ciśnienia w rozpatrywanym punkcie przepływu.

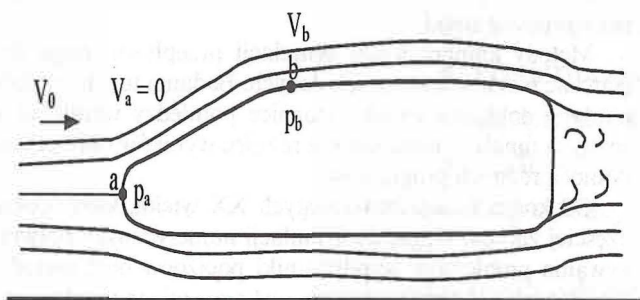
Pierwszy składnik ciśnienia w równaniu (1) jest to ciśnienie statyczne, drugi zaś – ciśnienie dynamiczne. Siły aerodynamiczne są wprost proporcjonalne do ciśnienia dynamicznego. Z tego względu często stosuje się zapis:

$$\text{ciśnienie dynamiczne} = \frac{1}{2} \rho V^2$$

W badaniach wygodnie jest rozpatrywać dynamiczne i statyczne ciśnienie w swobodnym strumieniu, daleko poza wpływem pojazdu. Jest to wówczas ciśnienie statyczne i dynamiczne strumienia swobodnego. Dla pojazdu lub pociągu poruszającego się po torze ciśnienie statyczne strumienia swobodnego jest ciśnieniem atmosferycznym.

Z równania Bernoulli'ego wynika, że w każdym punkcie, w którym prędkość przepływu równa się zero, ciśnienie musi osiągnąć swoją największą wartość.

Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie, opływ pojazdu w tunelu aerodynamicznym. Zaznaczono na nim również przebieg linii prądu powietrza.



Rys. 1. Opływ pojazdu w tunelu aerodynamicznym

W obszarze znajdującym się w pewnej odległości przed pojazdem, gdzie przepływ nie jest zakłócony jego wpływem, linie prądu są proste i równoległe do siebie.

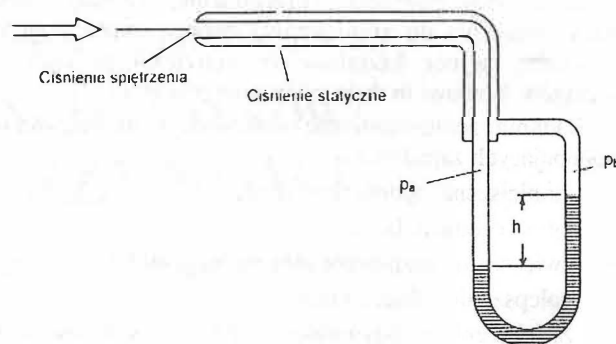
Obszar ten jest nazywany strumieniem swobodnym. Jeśli pojazd jest umieszczony w tunelu aerodynamicznym, to względna prędkość strumienia powietrza, znajdującego się z dala od lokalnych zmian spowodowanych obecnością pojazdu, jest nazywana prędkością strumienia swobodnego. Gdy pociąg jedzie w bezwietrznych warunkach, to jego względną prędkością jest po prostu prędkość jego jazdy.

Na rys. 1, na którym linia prądu w zetknięciu z pojazdem tworzy punkt a, prędkość powietrza wynosi zero. W tym punkcie występuje maksymalne ciśnienie, określone jako ciśnienie spiętrzenia.

Ciśnienie statyczne jest to ciśnienie panujące w przepływie. Ciśnienie takie występuje w punkcie b na rys. 1. Powierzchnia nadwozia w tym miejscu opływana jest z prędkością  $V_b$ , a panujące tam ciśnienie statyczne wynosi  $p_b$ . Ciśnienie osiąga wartość spiętrzenia tylko w tych miejscach, w których prędkość przepływu jest zerowa. Jest to największe możliwe ciśnienie, do jakiego można dojść w polu przepływu. Ciśnienie w punkcie spiętrzenia jest to ciśnienie całkowite.

Do pomiaru prędkości w przepływie można używać rurki Prandtla (rys. 2) lub anemometru laserowego. Rurka składa się z dwóch koncentrycznych rurek, z których wewnętrzna jest otwarta na czole, a zewnętrzna ma otworki pomiarowe na bocznych powierzchniach. Rurka wewnętrzna mierzy ciśnienie spiętrzenia, a rurka zewnętrzna przez otworki na obwodzie mierzy ciśnienie statyczne. Ich różnica, mierzona za pomocą manometru cieczowego, umożliwia wyznaczenie prędkości przepływu.

$$V = \sqrt{\frac{2(p_a - p_b)}{\rho}} \quad (2)$$



Rys. 2. Pomiar ciśnienia dynamicznego (różnica pomiędzy ciśnieniem spiętrzenia i statycznym) rurką Prandtla

Różnica pomiędzy lokalnym ciśnieniem statycznym  $p$  a ciśnieniem statycznym strumienia swobodnego  $p_0$  zależy wprost od ciśnienia dynamicznego strumienia swobodnego. Z tego względu stosunek różnicy ciśnienia lokalnego i ciśnienia statycznego strumienia swobodnego do ciśnienia dynamicznego strumienia swobodnego jest stały dla wszystkich prędkości. Stosunek ten nazywa się współczynnikiem ciśnienia  $C_p$  i wyraża się wzorem:

$$C_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho V_0^2} \quad (3)$$



gdzie:

- $p$  – lokalne ciśnienie statyczne,
- $p_0$  – ciśnienie statyczne strumienia swobodnego,
- $V_0$  – prędkość strumienia swobodnego.

Posługiwanie się współczynnikiem  $C_p$  do opisu zmiany ciśnienia jest wygodniejsze niż stosowanie aktualnego ciśnienia, ponieważ współczynnik nie zmienia się wraz z prędkością jazdy. Znając wartość  $C_p$  w jakimś miejscu można, posługując się zależnością (3), obliczyć ciśnienie przy dowolnej prędkości jazdy.

Współczynnik ciśnienia  $C_p$  może być również wykorzystany do określenia współczynników oporu ciśnienia  $C_x$  i  $C_y$ . Calkując  $C_p$  po ścianach pojazdu o powierzchni  $F$  i oznaczając  $C_x$  i  $C_y$  jako współczynniki oporu ciśnienia odniesione do powierzchni przekroju poprzecznego pojazdu  $S_1$  i  $S_2$ , otrzyma się:

$$C_x = \frac{P_x}{\frac{1}{2} \rho V^2 \cdot S_1} = \int_F C_p \cdot \frac{dF_x}{S_1} \quad (4)$$

i analogicznie dla współczynnika oporu siły bocznej

$$C_y = \frac{P_y}{\frac{1}{2} \rho V^2 \cdot S_2} = \int_F C_p \cdot \frac{dF_y}{S_2} \quad (5)$$

gdzie:

- $P_x$  i  $P_y$  – składowe siły ciśnienia wzdłuż osi  $x$  i  $y$ ,
- $F_x$  i  $F_y$  – rzuty powierzchni na płaszczyzny prostopadłe do osi  $x$  i  $y$ .

W tunelu aerodynamicznym ruch względny pomiędzy pojazdem i otaczającym go powietrzem jest odwrócony, co oznacza, że pojazd stoi i podlega nadmuchiowi przy prędkości powietrza równej prędkości jazdy.

W badaniach modelowych oprócz podobieństwa geometrycznego powinien być spełniony warunek dynamicznego podobieństwa przepływu wokół modelu i pojazdu naturalnej wielkości. W przepływie nieściśliwym warunek ten jest wówczas spełniony, kiedy liczba Reynoldsa dla modelu i pojazdu o wielkości rzeczywistej są równe.

Liczbę Reynoldsa definiuje się w postaci:

$$R_e = \frac{V_0 l}{\nu} \quad (6)$$

gdzie:

- $V_0$  – prędkość niezakłóconego przepływu [m/s],
- $l$  – długość pojazdu [m],
- $\nu$  – lepkość kinematyczna przepływającego powietrza [m<sup>2</sup>/s].

Dynamiczne podobieństwo zachodzi więc, gdy spełniona jest równość:

$$\frac{V_{01} l_1}{\nu} = \frac{V_{02} l_2}{\nu} \quad (7)$$

Indeksy 1 i 2 odnoszą się odpowiednio do modelu i do rzeczywistego obiektu. Nie zachowanie zasady podobieństwa Reynoldsa może doprowadzić do powstawania błędów zniekształcających wyniki pomiarów.

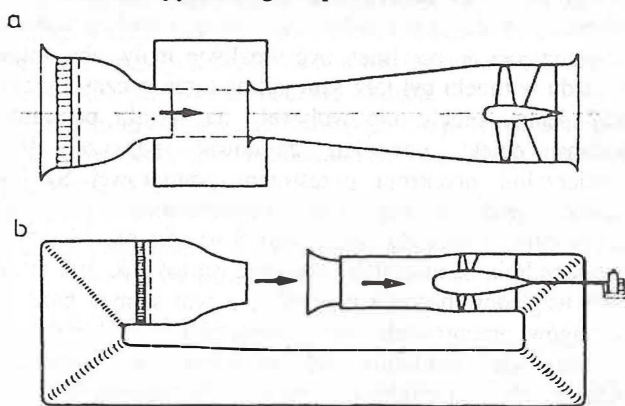
## 2.2. Budowa tuneli

Z równania (1) wynika, że do wytworzenia przepływu powietrza o określonej prędkości należy zapewnić odpowiednią energię ciśnienia. Warunek ten określa schemat konstrukcyjny tunelu aerodynamicznego malej prędkości.

W celu uniknięcia nieporozumienia warto zaznaczyć, że prędkość przepływu powietrza w tunelu aerodynamicznym malej prędkości to prędkość mniejsza od prędkości dźwięku, którego wartość na poziomie morza wynosi 1225 km/h. Natomiast duża prędkość w ruchu kolejowym wynosi  $> 200$  km/h. Tak więc prędkość przepływu w tunelu malej prędkości może być wielokrotnie większa od dużej prędkości na kolei.

Ze względu na sposób kierowania przepływem powietrza rozróżnia się dwa rodzaje tuneli (rys. 3):

- z otwartym obiegiem powietrza,
- z zamkniętym obiegiem powietrza.



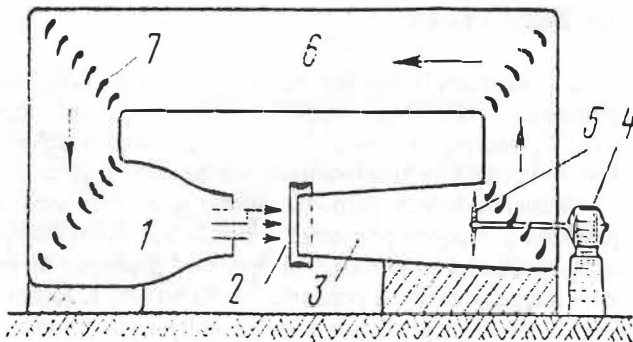
Rys. 3. Tunele aerodynamiczne: z otwartym (a) i zamkniętym (b) obiegiem powietrza

W tunelu z otwartym obiegiem powietrze jest czerpane z otoczenia i wydmuchiwane do otoczenia. Pomiędzy wlotem a wentylatorem znajduje się przestrzeń pomiarowa, w której umieszcza się badany obiekt. Wadą tego rodzaju tuneli jest uzależnienie wyników pomiarów od pogody, zaletą zaś są niższe koszty niż tuneli zamkniętych [5].

Wielkość, wydajność i jakość tunelu aerodynamicznego są określone przez następujące elementy konstrukcyjne (rys. 4):

- przestrzeń pomiarową, w której umieszcza się badany pojazd lub jego model,
- dyszę i dyfuzor, w których zmienia się prędkość i ciśnienie przepływu odpowiednio do potrzeb,
- dmuchawy i ich napęd,
- wymiennik ciepła (w tunelach klimatyzowanych).

W celu uzyskania jednorodnego strumienia powietrza w przestrzeni pomiarowej umieszcza się przed nią dyszę (dyfuzor), w której powietrze płynnie przyspiesza, na skutek odpowiednio dobranej zmiany przekroju dyszy. Tunele tak się projektuje, aby największa prędkość przepływu występowała w przestrzeni pomiarowej, dlatego jest to najwęższe miejsce w tunelu. Pomiędzy przestrzenią pomiarową a wentylatorem występuje dyfuzor zmniejszający prędkość przepływu przed wentylatorem. Całość jest tak skomponowana, aby uzyskać odpowiedniej wielkości przestrzeń pomiarową. Wszystkie te elementy występują w tunelach z otwartym i zamkniętym obiegiem powietrza.



Rys. 4. Schemat tunelu aerodynamicznego z zamkniętym obiegiem powietrza; 1 – dysza, 2 – przestrzeń pomiarowa, 3 – dyfuzor, 4 – napęd, 5 – wentylator, 6 – kanał prowadzący, 7 – łopatkowe zmiany kierunku

Głównym wymiarem przestrzeni pomiarowej jest jej powierzchnia przekroju poprzecznego  $S_d$ . Stosunek przekroju poprzecznego  $S$  badanego wagonu lub lokomotywy do powierzchni  $S_d$ , zwany współczynnikiem przesłonięcia  $\phi$ , powinien być możliwie mały, aby opływ pojazdu w tunelu był taki sam jak na torze w czasie jazdy. Aby ściany tunelu nie wpływały na wyniki pomiarów badany obiekt powinien zajmować najwyżej 10% powierzchni przekroju przestrzeni pomiarowej  $S_d$  [6]. Biorąc pod uwagę, że powierzchnia przekroju poprzecznego pojazdu szynowego  $S$  wynosi ok.  $10 \text{ m}^2$ , to powierzchnia  $S_d$  musiałaby osiągnąć wartość ok.  $100 \text{ m}^2$ . Z tych względów badania pojazdów, a tym samym bardziej pociągów, przeprowadza się na modelach.

Możliwie dokładne odwzorowanie w badaniach tunelowych warunków ruchu występujących w rzeczywistości wymaga uwzględnienia wpływu ziemi (toru). Symulowanie obecności podłoża pod modelem pojazdu jest utrudnione, ponieważ przy nieruchomej podłodze w przestrzeni pomiarowej tworzy się warstwa przyścienne, która powoduje, że warunki przepływu powietrza pod nadwoziem są inne niż w rzeczywistości.

W celu rozwiązania tego problemu stosuje się różne metody odwzorowania ziemi, a mianowicie:

- zwierciadlanego odbicia,
- stałej płyty,
- ruchomej taśmy,
- odsysania warstwy przyściennej i inne.

Bardziej obszerny opis tych metod zawierają prace [1, 4]. Niektóre wyniki badań ujęte w pracy [1] przedstawiono w tabeli 1.

Współczynniki oporów  $C_x$  przy zastosowaniu różnych urządzeń imitujących ziemię. Tabela 1.

Urządzenie naśladowujące	Skala	Z dala od ziemi	Stać płytą	Odbicie zwierciadlane
Kształt pojazdu				
Wagon bez osłon wyposażenia	1:50	0,34 (100%)	0,32 (94%)	0,325 (95%)
	1:20	0,22 (100%)	0,21 (95%)	---
Wagon z osłonami wyposażeniem	1:50	0,27 (100%)	0,29 (107%)	---
	1:20	0,17 (100%)	0,19 (111%)	---

Wyniki badań wykazują, że:

- zastosowanie stałej płyty lub odbicia zwierciadlanego daje w przybliżeniu te same wyniki,

- istotny wpływ na wielkość oddziaływania ziemi mają kształty pojazdu, a szczególnie kształt jego dolnej części,
- im pojazd jest mniej opływowy, tym wpływ ziemi jest mniejszy.

Dla pojazdu szynowego z nieosłoniętym wyposażeniem dolnej części wpływ ziemi zmniejsza opory, a dla całkowicie odsłoniętego wyposażenia i wózków wpływ ziemi powoduje zwiększenie oporów. W tym przypadku zdecydowana część oporów przypada na wózki.

Ważną rolę w badaniach tunelowych odgrywa ustawienie pojazdu w przestrzeni pomiarowej. Najprostszy sposób polega na postawieniu modelu na podłodze tunelu, na odseparowanych od niej powierzchniach połączonych z układem wagowym. Do pomiaru obciążeń potrzebna jest waga mierząca sześć składowych sił i momentów. Elementy wagi ustawione są w ten sposób, aby ich opływ powietrzem nie wpływał na pomiar. Są one na ogół zamontowane poniżej przestrzeni pomiarowej. W dobrze wyposażonych tunelach pomiary wykonywane są z wirującymi kołami. Wówczas pojazdy ustawia się na specjalnym stanowisku rolkowym. W tym przypadku stosunkowo łatwo mogą być stosowane metody niwelujące wpływ ziemi.

Ostatnimi laty nastąpił duży postęp w technice pomiarów. Połączenie nowych sond pomiarowych z komputerowymi technikami zbierania, przetwarzania i przekazywania danych pozwala na szybkie pomiary dużych obszarów przepływu w pobliżu pojazdu, a następnie na przetwarzanie tych danych i prezentację wizualną w postaci map wielu parametrów przepływu [4].

Technika pomiarów prędkości za pomocą termoanemometrów laserowych jest obecnie standardową metodą w komorach pomiarowych tuneli aerodynamicznych. Umożliwia ona pomiary prędkości lokalnych bardzo szybko zmieniających się.

Techniki te sprzyjają zmianom procesu projektowania pojazdów, uwalniając go od subiektywizmu projektanta, opartego na indywidualnym doświadczeniu. Stwarzają one możliwość optymalizacji kształtu pojazdu i jego charakterystyk.

Najbardziej wszechstronnymi tunelami, a jednocześnie najbardziej skomplikowanymi, są tunele klimatyczno-aerodynamiczne.

Największy w świecie tunel tego rodzaju dla pojazdów szynowych został oddany do użytku na początku 2003 roku w Wiedniu przez Rail Tec Arsenal [6].



Obok różnorodnych prób klimatycznych, dotyczących komfortu, bezpieczeństwa i homologacji pojazdów szynowych oraz ich zespołów, na stanowisku tym można przeprowadzać w szerokim zakresie badania aerodynamiczne. Badania pojazdów i złożonych z nich pociągów mogą być przeprowadzone na zmniejszonych modelach. Badania aerodynamiczne zespołów mogą być przeprowadzone w skali rzeczywistej. Jest to bardzo ważne w tych przypadkach, w których właściwości aerodynamiczne elementów konstrukcyjnych mogą się znacznie zmieniać wskutek oblodzenia i osiadania śniegu. Również zdolność do działania wielu zespołów może być z tego powodu zakłócona lub mogą one doprowadzić do awarii. Jeśli np. na odstawionym pojeździe osad lodu na pantografie jest tak duży, że układ nastawczy nie może wypełniać już swych zadań, to dochodzi do awarii całego pojazdu.

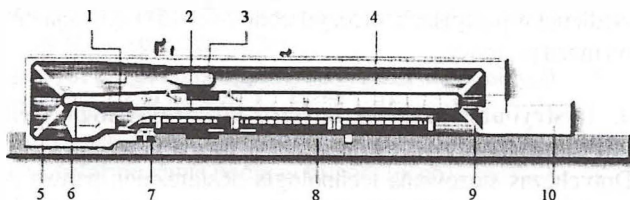
Również różne układy sprzęgowe na czole pojazdu muszą zachować zdolność do działania po przejeździe przez burzę śniegową. Tak więc przykładowo w ekstremalnych warunkach śniegu i lodu, w pojazdach dużej prędkości, musi dać się otwierać kłapa czołowa lub swobodnie umieszczony sprzęg musi dać się sprzęgać.

Ważne jest rozmieszczenie i konstrukcja otworów zasysających powietrze w pojeździe. Odpowiednie położenie i kształt siatek dla wpływającego strumienia musi zapewnić wystarczający dopływ powietrza ale jednocześnie musi być ograniczone dostawanie się i osadzanie śniegu na usytuowane za siatką filtry i agregaty.

Dostawanie się śniegu, zamieniającego się w wodę, w miejscu chłodzenia urządzeń elektrycznych, np. elektroniki napędu silników trakcyjnych, powoduje fatalne skutki.

W tunelu klimatyczno-aerodynamicznym można obserwować w sposób kontrolowany zachowanie się urządzeń w tych warunkach. Ponadto możliwe jest, na podstawie dokładnie odtworzonych sytuacji (prędkość wiatru, ilość śniegu, temperatura, czas trwania osnieżenia), porównanie różnych wariantów rozwiązań a nawet optymalizacji.

Opisane badania aerodynamiczne i klimatyczne stawiają specjalne wymagania dla stanowiska badawczego. Zapewnienie stałych warunków klimatycznych możliwe jest w tunelu z zamkniętym obiegiem, ponieważ w tunelu otwartym odpowiednie stany temperatury i wilgotności, przy dużych prędkościach wiatru, są praktycznie trudno osiągalne. Tunel z obiegiem zamkniętym ma jednak tę wadę, że nakład pracy dla równomiernego rozdzielania prędkości powietrza i niskiej intensywności turbulencji jest przy wejściu do przestrzeni pomiarowej wyższy. Przy kształcie tunelu klimatyczno-aerodynamicznego, przedstawionego na rys. 5, strata ciśnienia wymiennika ciepła oddziałuje w niewielkim stopniu na rozdział prędkości.



Rys. 5. Schemat tunelu klimatyczno-aerodynamicznego: 1 – czolowy obszar słoneczny, 2 – boczny obszar słoneczny, 3 – wentylator, 4 – tylny kanał prowadzący, 5 – narożnik zmiany kierunku, 6 – wymiennik ciepła, 7 – rolkowe stanowisko badawcze, 8 – tor badawczy (z obiektem badanym), 9 – narożnik zmiany kierunku może być podniesiony, 10 – wjazd

Dysza ściągająca pomiędzy wymiennikiem ciepła a przestrzenią pomiarową daje taki sam efekt i obniża ponadto intensywność turbulencji. Powierzchnia przekroju wyjściowego dyszy powinna w przybliżeniu odpowiadać powierzchni szczeliny obwodowej pomiędzy pojazdem a tą częścią tunelu aerodynamiczno-klimatycznego, w której umieszczono pojazd. Stwarza to możliwość badania – przy równych parametrach strumienia nacierającego i opływowego – przednich części pojazdów trakcyjnych, tak jak w badaniach na linii.

Przy budowie tuneli z długą przestrzenią roboczą uwzględnia się straty ciśnienia wzdłuż szczeliny obwodowej pomiędzy pojazdem a tunelem. Aby wyrównać ciśnienie, ściany tunelu budowane są w postaci dyfuzora o małym kącie rozwarcia. Stały przebieg ciśnienia można również uzyskać przez zmiany chropowatości ścian.

Zamierzony stan klimatyzacji osiąga się poprzez zastosowanie urządzenia chłodniczego odpowiedniej mocy. Odprowadza ono ciepło zarówno od obciążenia cieplnego badanego obiektu jak i ciepło wyprowadzone przez wentylator. Przy wyższych prędkościach nadmuchu zapotrzebowanie na moc chłodzenia znacznie wzrasta.

W celu uzyskania zwilżenia pojazdu, pokrycia śniegiem lub nawet oblodzenia, w tunelach zabudowuje się specjalne pierścienie natryskowe.

Spełnienie tych wszystkich wymagań czyni tunel klimatyczno-aerodynamiczny przydatnym do wszechstronnych badań lokomotyw i wagonów.

### 3. ZAKOŃCZENIE

Najbardziej skomplikowane zadania z dziedziny aerodynamiki praktycznie rozwiązuje się z reguły eksperymentalnie. Jednakże teoria wskazuje, w jaki sposób przeprowadzać doświadczenia, jak najdokładniej wykonywać pomiary, w jaki sposób wykorzystać wyniki poszczególnych eksperymentów dla szerszej klasy zjawisk i ustalać ilościowe zależności między nimi.

Do realizacji tego typu badań konieczne są różnego rodzaju, dobrze wyposażone, tunele aerodynamiczne.

Powyższe względy sprawiają, że niezależnie od dynamicznego rozwoju aerodynamiki numerycznej i możliwości coraz dokładniejszej symulacji złożonych przepływów, aerodynamika eksperymentalna pozostaje, i jeszcze długo będzie pozostawać, ważnym narzędziem w procesie projektowania nowoczesnych pojazdów.

### LITERATURA

- [1] Gąsowski W.: *Aerodynamika pociągu*. ITE. Radom 1998.
- [2] Gąsowski W.: *Aerodynamika w konstruowaniu, budowie i eksploatacji pojazdów szynowych*. *Pojazdy Szynowe*, nr 3/2002.
- [3] Gąsowski W.: *Structure of the train aerodynamic drag*. *Archives of Transport*. Vol. 12. Warsaw 2000, iss. 4
- [4] Piechna J.: *Podstawy aerodynamiki pojazdów*. WKŁ. Warszawa 2000.
- [5] Hucho W.H.: *Aerodynamika samochodu*. WKŁ. Warszawa 1988.
- [6] Bucek O.: *Aerodynamik im Klima – Wind – Kanal*. *El. Der Eisenbahn Ingenieur*, 8/2003.